

ANALISIS ASPEK KINEMATIK PERAMBATAN RUPTURE GEMPA SUMATERA-ANDAMAN 26 DESEMBER 2004

¹Budiman Zebua, ²Muhammad Nurul Fahmi, ³Tjipto Prastowo

¹ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: budiman.19023@mhs.unesa.ac.id

² Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadfahmi@unesa.ac.id

³ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: tjiptoprastowo@unesa.ac.id

Abstrak

Gempa Sumatera-Andaman 2004 memicu tsunami global yang menyapu pesisir barat Provinsi Aceh dan wilayah terdampak lain di berbagai belahan dunia. Banyak hal penting, misalnya proses kinematik *rupture* belum terjawab tuntas. Pertanyaan tentang parameter kinematik *rupture* (*rupture duration*, *rupture extent*, *rupture speed*, *rupture directivity*) dan mengapa Phuket, Thailand yang terpisah oleh daratan Sumatera bagian utara ikut terdampak tsunami dijawab melalui penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis dan mendiskripsikan proses *rupture* gempa M_w 9,1 Sumatera-Andaman 2004 dengan bantuan metode 0,25-1,0 Hz *multiple signal classification back-projection imaging* (MUSIC BPI) berbasis sinyal seismik gelombang *P* koheren berfrekuensi tinggi yang diperoleh dari jaringan stasiun seismik Eropa (*EU array*). Hasil analisis citra proses *rupture* beresolusi tinggi mendiskripsikan rambatan *unilateral* energi gempa *megathrust* menuju ke arah utara sepanjang jalur zona subduksi pertemuan Lempeng India, Lempeng Australia dan Lempeng Burma melewati Kepulauan Nicobar menuju Kepulauan Andaman. Analisis lanjut memanfaatkan radiator berfrekuensi tinggi menemukan radiasi gempa selama 480 s (durasi *rupture*) yang berkorelasi dengan panjang *rupture* 1400 km dan memindahkan energi gempa dengan laju 2,9 km/s (kecepatan *rupture*). Temuan penelitian ini sama dengan hasil-hasil penelitian terdahulu. Mekanisme pelepasan energi berlangsung dalam beberapa tahap, di mana pada detik ke 160 yang setara dengan jarak tempuh sekitar 400 km, energi gempa mencapai Kepulauan Nicobar dan mengalami amplifikasi akibat efek lokal sehingga memicu episenter baru sesudah episenter utama yang berada di lepas pantai barat Sumatera bagian utara. Episenter baru inilah yang memicu gelombang tsunami yang menerjang wilayah Phuket, Thailand.

Kata Kunci : kinematika *rupture*, gempa Sumatera-Andaman 2004, MUSIC BPI

Abstract

The 2004 Sumatra-Andaman earthquake triggered a global tsunami striking the west coast of Aceh Province and other affected areas around the world. Many things, such as rupture kinematics have not been resolved. Questions about kinematic parameters (*rupture duration*, *rupture extent*, *rupture speed*, *rupture directivity*) and why Phuket, Thailand, separated by northern Sumatra mainland, was affected by the wave are explained in this study. Thus, this study aims to analyze rupture processes of the 2004, M_w 9,1 Sumatra-Andaman event using 0.25-1.0 Hz *multiple signal classification back-projection imaging* (MUSIC BPI) on coherent *P*-wave signals. The high-frequency signals were obtained from a network of European stations (*EU array*). The results of high-resolution rupture image analysis showed unilateral propagation of the energy, heading north along

the subduction zone where Indian, Indo-Australian and Burmese plates meet and passing through Nicobar Islands towards Andaman Islands. Further analysis of high-frequency radiators found that the radiation lasted for 480 s (rupture duration) which correlated to a rupture length of 1400 km and transported the energy at a rate of 2.9 km/s (rupture velocity). All findings agree well with previous work. In addition, mechanisms for energy release took place in several stages, where at 160 seconds equivalent to a distance of 400 km, the energy reached Nicobar Islands and experienced amplification owing to local effects, causing a new epicenter after the main one, located off the westcoast of northern Sumatra Island. This new epicenter triggered a tsunami wave that hit Phuket, Thailand.

Keywords: rupture kinematics, Sumatra-Andaman 2004 earthquake, MUSIC BPI

I. PENDAHULUAN

Gempa merupakan pelepasan energi dari dalam interior Bumi dalam bentuk rambatan gelombang seismik yang menghasilkan guncangan tanah yang sangat signifikan (Satriano *et al.*, 2011; Ye *et al.*, 2013; Adam, 2018; Zhang, 2019). Guncangan tanah tersebut menimbulkan kerusakan fisik berupa kerusakan gedung, bangunan dan infrastruktur selain menimbulkan korban jiwa dan kerugian ekonomi yang masif (Xu *et al.*, 2009; Kiser, 2012; Satake *et al.*, 2014; Suppasri *et al.*, 2015). Potensi kerusakan akibat gempa bisa dipelajari melalui karakteristik sumber gempa yang dikenal sebagai *rupture*. Dalam hal ini, *rupture* memiliki parameter kinematik yang ikut menentukan potensi kerusakan wilayah, yaitu *rupture duration*, *rupture extent*, *rupture speed*, dan *rupture directivity* (Ishii *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2009; Meng *et al.*, 2011; Kiser and Ishii, 2017; Fahmi *et al.*, 2022).

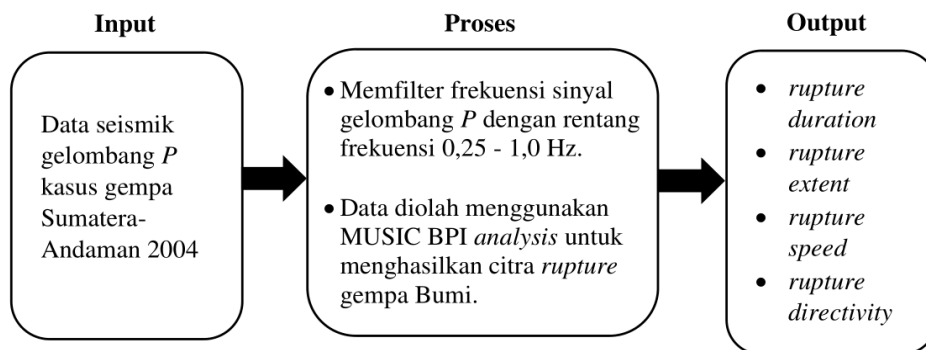
Berbagai upaya telah dilakukan untuk menyelesaikan masalah kompleksitas sumber gempa, khususnya gempa besar seperti gempa Sumatera-Andaman pada 26 Desember 2004 (Ishii *et al.*, 2005; Larmat *et al.*, 2006; Ishii *et al.*, 2007; Satake *et al.*, 2014; Suppasri *et al.*, 2015; Kiser and Ishii, 2017). Gempa M_w 9,1 Sumatera-Andaman pada tanggal 26 Desember 2004 menarik perhatian global karena memicu gelombang tsunami yang dahsyat dengan ratusan ribu korban jiwa dan cakupan daerah terdampak yang luas mencapai Pulau Phuket, Thailand (Satriano *et al.*, 2011; Satake, 2014; Suppasri *et al.*, 2015). Pada tahap awal, rambatan gelombang gempa diperkirakan pecah sejauh 300 km di bagian barat laut Sumatera dalam waktu sekitar 300 detik diukur dari *onset time*. Namun, studi *teleseismic imaging* dari rambatan *rupture* menemukan durasi *rupture* jauh lebih lama, yaitu sekitar 8 menit (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007). Perbedaan perkiraan awal dengan hasil studi *teleseismic imaging* tersebut menantang saintis untuk memodelkan rambatan sumber gempa dengan lebih akurat lagi.

Teknik yang diperkenalkan adalah dengan memanfaatkan koherensi gelombang *P* dalam data *teleseismic* yang diperoleh dari jaringan *dense seismic array* (Rost and Thomas, 2002) dengan membalik rekam jejak rambatan gelombang gempa yang biasa dikenal dengan teknik pencitraan balik (*back-projection technique*). Teknik ini pertama kali diterapkan dengan sukses untuk menentukan parameter kinematik *rupture* kasus gempa Sumatra-Andaman 2004 (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007). Keunggulan teknik pencitraan balik adalah membutuhkan lebih sedikit asumsi sehingga lebih cepat dalam pemrosesan data (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007; Meng *et al.*, 2011; Kiser, 2012).

Teknik pencitraan balik didasari oleh fase koheren seluruh sinyal seismik dari sumber gempa yang direkam oleh masing-masing stasiun seismik. Dengan input awal sinyal seperti itu, maka hasil akhir pemrosesan sinyal tidak dipengaruhi oleh variasi struktur lapisan batuan dan geometri patahan dan tidak dibatasi oleh parameterisasi kinematika *rupture* (An and Meng, 2016; Meng *et al.*, 2018). Oleh karena itu, teknik pencitraan balik diadopsi dalam penelitian ini untuk mempelajari proses kinematik *rupture* yang memicu gempa besar (Xu *et al.*, 2009; Meng *et al.*, 2011; Kiser and Ishii, 2017). Hal ini karena peristiwa gempa Sumatera-Andaman 2004 yang memicu tsunami global masih menyisakan masalah tentang mekanisme rambatan tsunami dari episenter gempa menuju lokasi di sekitar episenter, khususnya lokasi-lokasi yang terhalang oleh daratan Sumatera bagian utara, misalnya Pantai Phuket, Thailand. Fokus penelitian adalah analisis proses kinematik rambatan *rupture* gempa (An and Meng, 2016; Kiser and Ishii, 2017; Bao *et al.*, 2019; Du, 2021) yang dapat direpresentasikan melalui besaran terukur *rupture duration* (ukuran seberapa lama *rupture* bergetar), *rupture extent* (ukuran seberapa jauh pergerakan *rupture* diukur dari sumber), *rupture speed* (ukuran seberapa cepat energi seismik dipindahkan dari sumber), *rupture directivity* (arah rambatan *rupture* sekaligus energi gempa).

II. METODE

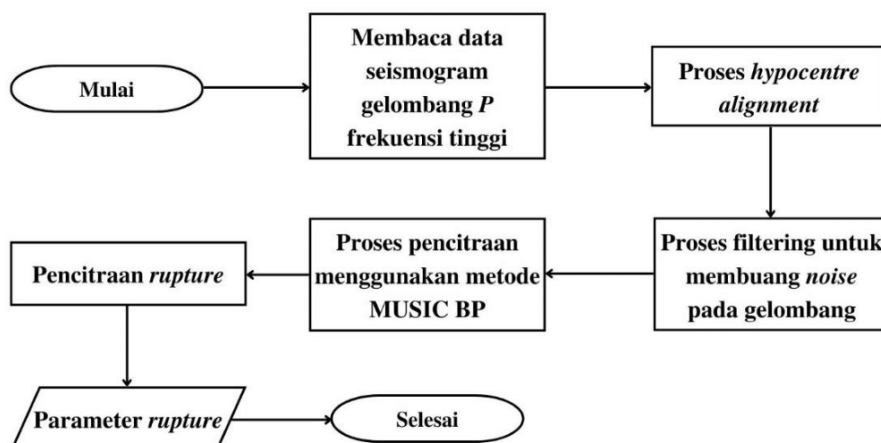
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah multiple signal classification back-projection imaging (MUSIC BPI) yang bertumpu pada rekaman sinyal seismik yang diterima oleh jaringan stasiun seismik yang tersebar dalam wilayah teleseismik (agar kemudahan proses koherensi fase gelombang terjaga) diukur dari episenter. Data penelitian diperoleh dari laman *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS) Wilber 3 (http://ds.iris.edu/wilber3/find_event) berupa sinyal seismik gelombang *P* frekuensi tinggi gempa Sumatera-Andaman 26 Desember 2004 yang terekam jaringan stasiun seismik Eropa (EU array). Rekaman sinyal seismik gelombang *P* dapat diunduh dengan format SAC binary (little-endian) melalui request via laman IRIS Wilber 3 pada *channel vertical only* (BHZ). Alasan pemilihan komponen vertikal karena tingkat *noise* yang paling rendah dibandingkan dengan komponen horisontal (Benavente and Cummins, 2013). Data seismik ini kemudian diolah menggunakan teknologi MUSIC BPI beresolusi tinggi sehingga menghasilkan citra *rupture* gempa Bumi yang akurat. Analisis citra *rupture* gempa Bumi memberikan seluruh parameter kinematik *rupture* tersebut. Rancangan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Rancangan penelitian kinematika *rupture* gempa Sumatera-Andaman 2004.

Gempa Sumatera-Andaman 26 Desember 2004 dengan kekuatan M_w 9,1 dan lokasi episenter $3,41^\circ$ LU dan $95,90^\circ$ BT di wilayah lepas pantai barat Sumatera merupakan gempa yang merambat dari lepas pantai barat Sumatera bagian utara menuju dekat Kepulauan Andaman. Gempa ini dijadikan sampel karena memiliki magnitudo besar sehingga penerapan metode BPI bisa menghasilkan citra proses *rupture* yang akurat seperti kasus gempa besar di berbagai penjuru dunia (Wang *et al.*, 2016; Kisher and Ishii, 2017; Meng *et al.*, 2018; Bao *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2020; Du, 2021; Li *et al.*, 2022). Dalam konteks gempa besar pemicu tsunami, teknik ini telah sukses digunakan oleh An and Meng (2016) untuk memprediksi rambatan tsunami lintas Samudera Pasifik, yaitu tsunami Tohoku, Jepang 2011; Iquique, Chili 2014 dan Illapel, Chili 2015 dalam daerah *near-field*, di mana ketersediaan data tsunami di lapangan sangatlah terbatas.

Pengolahan data penelitian melibatkan variabel-variabel yang telah lebih awal ditentukan. Secara struktur langkah pengolahan data dapat digambarkan melalui Gambar 2 di bawah ini.



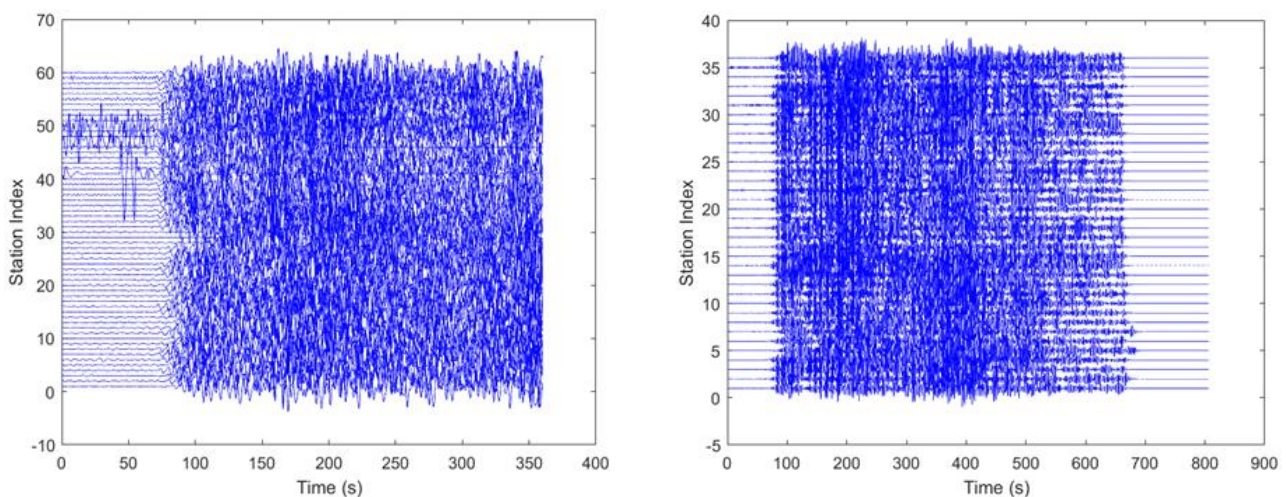
Gambar 2. Bagan pengolahan data penelitian kinematika *rupture* gempa Sumatera-Andaman 2004.

Pengolahan sinyal bersifat kualitatif karena fokus pada kualitas hasil pengolahan sinyal meskipun tetap memperhatikan kuantitas hasil pengolahan (jika ada yang perlu dibandingkan dengan penelitian terdahulu). Data yang diperlukan adalah seismogram gelombang *P* dengan komponen vertikal (BHZ). Pengolahan sinyal diawali dengan memasukkan data ke dalam aplikasi *matrix laboratory*. Kemudian dilakukan proses *hypocentre alignment* agar seismogram gelombang *P* memiliki lokasi titik pusat yang selaras di mana setiap sinyal seismik memiliki fase awal yang sama. Agar *output* berupa citra *rupture* yang diperoleh adalah akurat dan terarah, maka perlu dilakukan proses pemfilteran pada gelombang *P* untuk menghilangkan *noise* yang bisa mereduksi resolusi pencitraan. Data seismogram yang koheren dan terfilter tersebut digunakan sebagai masukan dalam proses pencitraan menggunakan MUSIC BPI. Hasil akhir pengolahan data adalah citra karakteristik kinematik *rupture* (*rupture duration*, *rupture extent*, *rupture speed*, *rupture directivity*) gempa Sumatera-Andaman 2004.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil-hasil penelitian ini dipaparkan melalui produk gambar yang dihasilkan meliputi: (1) perbandingan seismogram sebelum dan sesudah pemfilteran melalui proses *hypocenter alignment*, (2) propagasi *rupture* peristiwa gempa Sumatera-Andaman 2004, (3) kinematika propagasi *rupture* hasil pencitraan dari MUSIC BPI untuk peristiwa gempa Sumatera-Andaman 2004.

Gempa tektonik berkekuatan M_w 9,1 yang terjadi di Sumatera-Andaman pada 26 Desember 2004 terekam oleh salah satu jaringan stasiun seismik global, yaitu stasiun seismik Eropa (*EU array*) (Larmat *et al.*, 2006). Hasil rekaman gelombang seismik *P* diolah dengan menggunakan MUSIC BPI yang telah terbukti berhasil memberikan citra resolusi tinggi *rupture* gempa Tohoku-Oki, Jepang 2011 (Meng *et al.*, 2011), gempa Illapel, Chili 2015 (Meng *et al.*, 2018) dan gempa Donggala, Indonesia 2018 (Bao *et al.*, 2019). Gelombang *P* yang direkam oleh *EU array* masih memiliki *noise* yang mengganggu dan mereduksi resolusi hasil pencitraan *rupture*. Untuk menghilangkan *noise* tersebut, maka dilakukan pemfilteran dengan rentang 0,25-1,0 Hz sebelum menjadi input pada MUSIC BPI agar diperoleh sinyal koheren (An and Meng, 2016; Fahmi *et al.*, 2022). Gambar 3 berikut adalah perbandingan antara seismogram dari *EU seismic array* sebelum dan setelah pemfilteran.



Gambar 3. Seismogram sebelum (kiri) dan sesudah pemfilteran (kanan) melalui proses *hypocenter alignment* untuk menyamakan fase awal gelombang *P*.

Gambar 3 (panel kiri) menunjukkan *unfiltered seismogram* (data mentah) dan Gambar 3 (panel kanan) menunjukkan seismogram dari *seismic array* yang sudah difilter. Terlihat bahwa seismogram dari *seismic array* yang sudah difilter memiliki citra gelombang *P* yang lebih halus dengan fase awal yang sama (koheren) dan level *noise* yang lebih rendah dibandingkan dengan *unfiltered seismogram*. Pencitraan gelombang yang halus dengan fase awal yang sama dan level *noise* yang lebih rendah digunakan sebagai proses awal pengolahan sinyal melalui MUSIC BPI karena pemfilteran merupakan tahap awal pengolahan sinyal yang belum koheren (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007; Meng *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2018; Zeng *et al.*, 2020; Fahmi *et al.*, 2022).

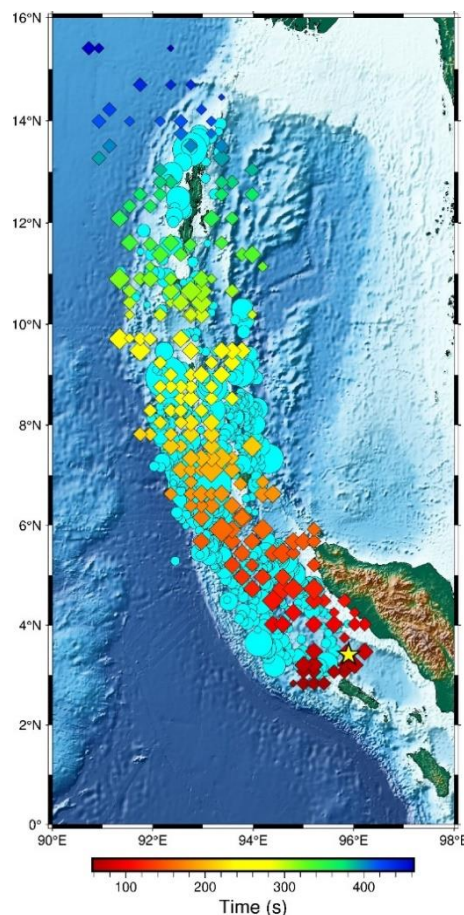
Pemfilteran pada rentang frekuensi 0,25-1,0 Hz (An and Meng, 2016) adalah yang paling ideal dan bisa dijadikan *input* pada MUSIC BPI ketika melakukan pengolahan sinyal dan pencitraan *rupture* gempa besar, misalnya gempa Sumatera-Andaman 2004. Tujuan pemfilteran adalah peningkatan kualitas sinyal seismik

agar hasil citra BPI menjadi akurat (Meng *et al.*, 2018; Bao *et al.*, 2019; Zhang, 2019; Zeng *et al.*, 2020; Du, 2021). Pemilihan rentang frekuensi pemfilteran berdasarkan bentuk gelombang *P* dari data (mentah) teleseismik yang masih mengandung banyak *noise* sehingga diperlukan pemfilteran frekuensi yang lebih tinggi untuk memperoleh bentuk gelombang seismik yang diharapkan (Fahmi *et al.*, 2022).

Gempa tektonik Sumatera-Andaman 2004 (M_w 9,1) memiliki luas cakupan gempa susulan (*aftershocks*) yang sebanding dengan tiga gempa besar yang pernah tercatat di dunia, yaitu: gempa Aleutian 1957 (M_w 8,6), Chili 1960 (M_w 9,5) dan Alaska 1964 (M_w 9,2) (Ishii *et al.*, 2005). Hal ini karena energi gempa yang dilepaskan sangat besar, setara dengan momen seismik $\sim 10^{23}$ Nm (Bilek *et al.*, 2007) sehingga memiliki jangkauan *rupture* (*rupture extent*) yang sangat panjang (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007; Kiser, 2012; Kiser and Ishii, 2017). Temuan terkini memberi konfirmasi *rupture* gempa yang memindahkan energi seismik yang besar berasosiasi dengan gempa tektonik yang memiliki magnitudo besar (Poli and Prieto, 2016; Du, 2021, Neo *et al.*, 2022).

Dampak gempa dapat dipelajari melalui analisis terukur terhadap aspek kinematik *rupture*, misalnya panjang *rupture*, durasi *rupture*, kecepatan dan arah propagasi *rupture* gempa (An and Meng, 2016; Kiser and Ishii, 2017; Bao *et al.*, 2019; Du, 2021; Fahmi *et al.*, 2022). Dalam konteks gempa Sumatera-Andaman 2004, parameter kinematik *rupture* gempa dapat ditentukan dan dianalisis melalui hasil pencitraan *rupture* dengan menggunakan teknik MUSIC BPI. Teknik ini merupakan salah satu metode BPI yang dapat menghasilkan citra sumber gempa yang kompleks karena ekstensi *rupture* dalam skala ruang spasial dan waktu yang relatif panjang (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007) dengan resolusi tinggi dan akurat (Meng *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2018; Bao *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2020).

Data yang dibutuhkan adalah data gelombang *P* dari stasiun *seismic array* (misalnya EU array dalam penelitian ini) yang telah difilter dan bersifat koheren untuk mengurangi efek *noise* dan ketidakpastian hasil pencitraan (An and Meng, 2016; Kiser and Ishii, 2017; Zhang, 2019; Zeng *et al.*, 2020; Fahmi *et al.*, 2022). Hasil pencitraan propagasi *rupture* gempa Sumatera-Andaman 2004 dengan menggunakan teknik MUSIC BPI dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan pencitraan *rupture* inilah dua aspek kinematik rambatan *rupture* dapat ditemukan, yaitu panjang ekstensi *rupture* dan arah propagasi *rupture*.



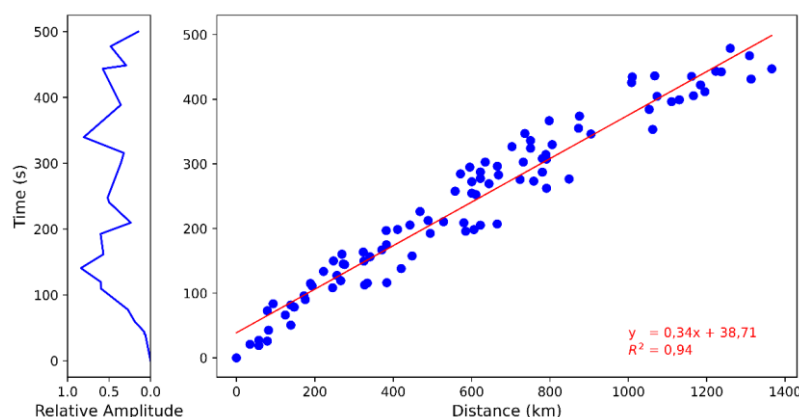
Gambar 4. Propagasi *rupture* peristiwa gempa Sumatera-Andaman 2004 dengan episenter (bintang kuning), gempa susulan (bulatan biru), dan propagasi *rupture* (kotak berwarna merah, oranye, kuning, hijau dan biru berturut-turut semakin jauh dari sumber gempa).

Gambar 4 menunjukkan hasil pencitraan gempa Sumatera-Andaman 2004 yang berkualitas tinggi dan akurat sehingga parameter kinematik *rupture* gempa dapat dianalisis dengan jelas. Lokasi episenter gempa ditunjukkan oleh bintang berwarna kuning. Secara kasar, energi radiasi gempa dirambatkan oleh *rupture* secara *unilateral* ke arah utara Sumatera melewati Kepulauan Nicobar dan menuju Kepulauan Andaman. Temuan arah propagasi *rupture* ini konsisten dengan hasil penelitian terdahulu (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007; Kiser, 2012; Kiser and Ishii, 2017).

Durasi rambatan *rupture* yang diilustrasikan pada Gambar 4 adalah mulai dari *onset time* sampai saat *rupture* telah merambat selama 480 s (kotak biru tua). Pada awal kejadian, di mana distribusi energi masih di sekitar lokasi episenter, ukuran energi radiasi seismik yang dirambatkan relatif kecil (kotak merah tua). Setelah beberapa saat, energi radiasi yang dilepaskan semakin besar dan mencapai maksimum beberapa kali, yaitu saat detik ke 140 berkorelasi dengan jarak sekitar 300 km dari episenter (kotak oranye), detik ke 160 berkorelasi dengan jarak sekitar 400 km dari episenter (kotak kuning tua) dan detik ke 340 berkorelasi dengan jarak sekitar 925 km (kotak hijau muda). Saat *rupture* gempa telah merambat selama lebih dari 480 s, energinya terlihat mulai melemah (kotak biru tua) namun *rupture* gempa tetap membawa *considerable amount of energy* melewati Kepulauan Nicobar menuju ke arah Kepulauan Andaman sejauh sekitar 1340 km dari episenter. Hasil pencitraan *rupture* dengan menggunakan teknik MUSIC BPI sesuai dengan temuan terdahulu (Ishii *et al.*, 2005) yang berhasil menghitung durasi *rupture* gempa Sumatera-Andaman 2004 adalah ~ 8 menit.

Gambar 4 mengilustrasikan lokasi gempa susulan berasosiasi dengan arah rambatan *rupture* (Yukutake and Iio, 2017). Wilayah Sumatera-Andaman merupakan daerah rawan gempa tektonik. Hal ini karena kehadiran sesar aktif, yaitu sesar yang mengisi zona subduksi barat daya Pulau Sumatra yang membentang dari Himalaya melalui Myanmar menuju ke selatan melewati Kepulauan Andaman dan Nicobar (McCaffrey, 2009). Pada umumnya, *rupture* gempa mengikuti jalur sesar aktif di sepanjang wilayah yang terdampak. Gempa susulan dan arah *rupture* saling berhimpitan mengarah ke utara Pulau Sumatera yang menunjukkan bahwa *rupture* gempa Sumatera-Andaman 2004 merambat sepanjang sesar aktif yang dibentuk melalui proses geologi dan tektonik di wilayah selatan Himalaya.

Gempa Sumatera-Andaman 2004 merupakan gempa besar tercatat di dunia dengan jangkauan *rupture* yang sangat panjang (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007). Gempa ini memicu tsunami lintas Samudera Hindia hingga mencapai Phuket, Thailand yang cukup jauh dari episenter gempa dan terhalang oleh Pulau Sumatera bagian utara. Secara teori perambatan gelombang, kecil kemungkinan gelombang tsunami bisa mencapai lokasi Phuket, Thailand. Namun, fakta sejarah membuktikan bahwa lokasi Phuket, Thailand adalah termasuk daerah terdampak tsunami Aceh 2004 (Suppasri *et al.*, 2015). Penjelasan peristiwa sapuan gelombang tsunami di Phuket, Thailand adalah sebagai berikut. Pada detik ke 160 atau jarak 400 km, energi gempa mencapai wilayah Pulau Nicobar pada koordinat 7,1° LU dan 93,8° BT dan terjadi pelepasan energi maksimum di sekitar pulau tersebut. Hal ini memicu *rupture* gempa yang telah tiba di sekitar Pulau Nicobar menjadi episenter baru sesudah episenter utama di pantai barat Sumatera. Energi maksimum yang dilepaskan di Pulau Nicobar menjadi pemicu gelombang tsunami yang mencapai Phuket, Thailand. Pelepasan energi seismik melalui rambatan *rupture* memberikan konsekuensi bahwa energi gempa dipindahkan dalam ruang dengan kecepatan *rupture* (Weng and Ampuero, 2020). Dalam hal ini, kecepatan *rupture* gempa merupakan gradien dari grafik garis lurus hasil dari regresi linier jarak tempuh *rupture* gempa terhadap waktu rambat *rupture* gempa dihitung dari lokasi episenter seperti terlihat pada panel sebelah kanan dari Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Kinematika propagasi *rupture* hasil dari MUSIC BPI untuk peristiwa gempa Sumatera-Andaman 2004 yang terekam oleh jaringan stasiun seismik Eropa. Panel sebelah kanan menunjukkan regresi linier (garis

lurus merah) dari radiator seismik frekuensi tinggi (bulatan biru) yang berasal dari rambatan *rupture* gempa. Gradien garis lurus merah adalah 0,34 yang menunjukkan kecepatan *rupture* gempa sebesar 2,94 km/s. Panel sebelah kiri menunjukkan dua kali fase puncak energi, yaitu pada detik ke 138,71 dan 338,71. Sesudah 480 s, terlihat energi radiasi gempa mulai melemah.

Gambar 5 mengilustrasikan rambatan *rupture* sepanjang sumbu horisontal sejauh hampir 1400 km dari lokasi episenter dalam waktu yang ditunjukkan oleh sumbu vertikal selama 480 s. Berdasarkan data ini, perhitungan sederhana gerak uniform memberikan kecepatan *rupture* sebesar 2,92 km/s (*sub-shear wave speed*), konsisten dengan gradien garis lurus merah pada Gambar 5, namun jauh lebih kecil dari 4,1 km/s sebagai kecepatan *super-shear rupture* pada kasus gempa Donggala 2018 yang memicu kasus tsunami Palu 2018 (Bao *et al.*, 2019). Temuan kecepatan *rupture* ini sesuai dengan penelitian terdahulu (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007). Analisis tentang kecepatan *shear wave* (*sub-shear* atau *super-shear rupture*) adalah penting karena bisa digunakan untuk penentuan klasifikasi tanah dan batuan yang berada di jalur *rupture* gempa. Gempa tektonik dengan kecepatan *rupture* lebih besar dari 1,5 km/s biasa terjadi pada lapisan batuan kerak yang berstruktur padat dan keras (Rusdy *et al.*, 2017). Hal ini berarti lapisan batuan yang dilalui oleh *rupture* gempa Sumatera-Andaman 2004 tersusun dari lapisan batuan geologi tua dengan stres yang relatif tinggi.

Sejalan dengan rambatan *rupture* gempa Sumatera-Andaman 2004, energi radiasi gempa juga dapat dipelajari melalui distribusi energi ternormalisasi terhadap waktu rambat *rupture* seperti terlihat pada panel sebelah kiri Gambar 5. Distribusi energi ternormalisasi ditunjukkan oleh kurva amplitudo radiasi yang ternormalisasi, di mana amplitudo ternormalisasi setiap saat diperoleh dari amplitudo terukur dibagi dengan amplitudo maksimum sinyal input yang telah melalui proses pemfilteran. Gambar 5 dengan demikian mendiskripsikan proses *rupture* (variasi spasial dan temporal) sebagai bagian dari kinematika *rupture* gempa (Fahmi *et al.*, 2022).

Panel sebelah kiri pada Gambar 5 menunjukkan rambatan *rupture* yang membawa energi gempa yang relatif tinggi ke arah utara (lihat Gambar 4) selama hampir 500 s dengan menempuh jarak hampir 1400 km dari episenter utama gempa Sumatera-Andaman 2004. Garis lurus merah pada panel sebelah kanan dengan persamaan $y = 0,34x + 38,71$ dimana x adalah jarak terukur dalam satuan kilometer dan y adalah waktu rambat terukur dalam satuan sekon mengalami *offset* dari titik potong sumbu vertikal pada $t = 38,71$ s. Oleh karena itu, puncak pelepasan energi gempa yang pertama (panel kiri Gambar 5) terjadi saat $t = 138,71 \approx 140$ s bersesuaian dengan jarak 300 km arah utara dari episenter (Gambar 4). Puncak pelepasan energi gempa yang kedua (panel kiri Gambar 5) terjadi pada saat $t = 338,71 \approx 340$ s bersesuaian dengan jarak 925 km arah utara dari episenter (Gambar 4). Dengan demikian, ada kesesuaian antara Gambar 4 dan Gambar 5, di mana ditemukan dua aspek kinematik *rupture* yang lain, yaitu durasi *rupture* selama 480 s dan kecepatan *rupture* sebesar 2,9 km/s sesuai dengan temuan terdahulu (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007).

IV. KESIMPULAN

Dengan mengolah sinyal koheren gelombang *P* berfrekuensi tinggi yang berasal dari EU *seismic array* melalui http://ds.iris.edu/wilber3/find_event MUSIC BPI telah berhasil digunakan untuk menganalisis aspek kinematik (*rupture duration*, *rupture extent*, *rupture speed*, dan *rupture directivity*) rambatan *rupture* gempa Sumatera-Andaman 2004. Hasil analisis berupa citra *rupture* gempa beresolusi tinggi yang mendiskripsikan kinematika *rupture* dan berhasil menjelaskan mengapa gelombang tsunami Aceh bisa mencapai Pulau Phuket, Thailand yang terhalang dari lokasi episenter utama oleh daratan Pulau Sumatera bagian utara. Berdasarkan citra proses *rupture*, gelombang gempa merambat unilateral ke arah utara Pulau Sumatera sepanjang jalur zona subduksi yang dibentuk oleh pertemuan Lempeng India, Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Burma melewati Kepulauan Nicobar menuju Kepulauan Andaman sejauh hampir 1400 km. Temuan arah propagasi dan panjang ekstensi *rupture* ini konsisten dengan temuan terdahulu (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007; Kiser, 2012; Kiser and Ishii, 2017). Analisis radiator seismik memberikan konfirmasi proses *rupture* selama 480 s yang memindahkan energi dalam beberapa tahap dengan kecepatan (*sub-shear*) *rupture* 2,9 km/s. Temuan durasi dan kecepatan *rupture* ini sama dengan temuan terdahulu (Ishii *et al.*, 2005; Ishii *et al.*, 2007). Pada detik ke 160, pelepasan energi dengan intensitas maksimum di sekitar wilayah Kepulauan Nicobar memicu episenter baru. Episenter baru ini menjadi jawab mengapa gelombang tsunami Aceh 2004 bisa mencapai Phuket, Thailand.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan terimakasih kepada *reviewers* yang telah memberikan masukan bermanfaat untuk kesempurnaan artikel IFI ini. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada pihak pengelola laman laman IRIS Wilber 3 (http://ds.iris.edu/wilber3/find_event) dari mana sinyal gelombang *P* frekuensi tinggi gempa Sumatera-Andaman 26 Desember 2004 yang terekam jaringan stasiun seismik Eropa (EU array) diunduh sebagai data sekunder penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, M. N. 2018. *Subject-oriented finite fault inversions and their applications*. Dissertation, University of California at Santa Barbara, California, US, pp. 1-146. Unpublished work.
- An, C. and Meng, L. 2016. Application of array backprojection to tsunami prediction and early warning. *Geophysical Research Letter*, Vol. 43, Issue 8, pp. 3677-3685.
- Bao, H., Ampuero, J-P, Meng, L., Fielding, E. J., Liang, C., Milliner, C. W. D., Feng, T. and Huang, H. 2019. Early and persistent supershear rupture of the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake. *Nature Geoscience*, Vol. 12, pp. 200-205.
- Benavente, R. and Cummins, P. R. 2013. Simple and reliable finite fault solutions for large earthquakes using the W-phase: the Maule ($M_w = 8.8$) and Tohoku ($M_w = 9.0$) earthquakes. *Geophysical Research Letter*, Vol. 40, Issue 14, pp. 3591-3595.
- Du, H. 2021. Estimating rupture front of large earthquakes using a novel multi-array back-projection method. *Frontiers in Earth Science. Section: Solid Earth Geophysics*, Vol. 9, Article 680163.
- Fahmi, M. N., Realita, A., Risanti, H., Prastowo, T. and Madlazim. 2022. back-projection results for the M_w 7.5, 28 September 2018 Palu earthquake-tsunami. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP, Vol. 2377, 012032.
- Ishii, M., Shearer, P. M., Houston, H. and Vidale, J. E. 2005. Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-net array. *Nature Letters*, Vol. 435, pp. 933-936.
- Ishii, M., Shearer, P. M., Houston, H. and Vidale, J. E. 2007. Teleseismic *P* wave imaging of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman and 28 March 2005 Sumatra earthquake ruptures using the Hi-net array. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, Issue B11.
- Kiser, E. D. 2012. *Earthquake characteristics as imaged by the back-projection method*. Dissertation, Harvard University at Cambridge, Massachusetts, US, pp. 1-176. Unpublished work.
- Kiser, E. D. and Ishii, M. 2017. Back-projection imaging of earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 45, pp. 271-299.
- Larmat, C., Montagner, J-P., Fink, M., Capdeville, Y., Tourin, A. and Eric, C. 2006. Time-reversal imaging of seismic sources and application to the Great Sumatra Earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, Issue 13.
- Meng, L., Inbal, A. and Ampuero, J-P. 2011. A window into the complexity of the dynamic rupture of the 2011 M_w 9 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, Issue 7.
- Meng, L., Bao, H., Huang, H., Zhang, A., Bloore, A. and Liu, Z. 2018. Double pincer movement: encircling rupture splitting during the 2015 M_w 8.3 Illapel earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 495, pp. 164-173.
- Rusydy, I., Jamaluddin, K., Fatimah, E., Syafrizal, Andika, F., and Furumoto, Y. 2017. Estimation of site amplifications from shear-wave velocity at pyroclastic deposits and basins in Aceh Tengah and Bener Meriah District, Aceh Province, Indonesia. *International Journal of Disaster Management*, Vol. 1, pp. 46-54.
- Satake, K. 2014. Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian ocean tsunami. *Geoscience Letters*, Vol. 1, Issue 15.
- Satriano, C., Wu, Y-M., Zollo, A. and Kanamori, H. 2011. Earthquake early warning: concepts, methods and physical grounds. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, Issue 2, pp.106-118.
- Suppasri, A., Goto, K., Muhari, A., Ranasinghe, P., Riyaz, M., Affan, M., Mas, E., Yasuda, M. and Imamura, F. 2015. A decade after the 2004 Indian Ocean Tsunami: the progress in disaster preparedness and future challenges in Indonesia, Sri Lanka, Thailand, and the Maldives. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, pp. 3313-3341.
- Weng, H. and Ampuero, J-P. 2020. Continuum of earthquake rupture speeds enabled by oblique slip. *Nature Geoscience*, Vol. 13, pp. 817-821.
- Xu, Y., Koper, K. D., Sufri, O., Zhu, L. and Hutko, A. R. 2009. Rupture imaging of the M_w 7.9 12 May 2008 Wenchuan earthquake from back projection of teleseismic *P* waves. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol. 10, Issue 4, No. 4.

- Zeng, H., Wei, S. and Wu, W. 2020. Sources of uncertainties and artefacts in back-projection results. *Geophysical Journal International*, Vol. 220, Issue 2, pp. 876-891.
- Zhang, A. 2019. *Theories and applications of enhanced earthquake back-projection imaging*. Dissertation, University of California at Los Angeles, Los Angeles, US, pp. 1-140.